

Conectando el fósforo del suelo con la planta *

Gerardo Rubio

Facultad de Agronomía, UBA, Av. San Martín 4453

rubio@agro.uba.ar

Publicado en *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, N°16, Diciembre 2002

Introducción

En la naturaleza, son excepcionales los casos de plantas que han evolucionado en ambientes sin limitaciones. Por el contrario, las plantas debieron y deben enfrentar restricciones impuestas por uno o varios recursos en forma simultánea. Es por ello que el concepto de eficiencia en el uso de recursos aparece desde la formación misma de las especies y constituye un factor clave en su evolución. Como regla general, las especies que evolucionan en ambientes pobres en determinados recursos tienden a desarrollar mecanismos para maximizar su utilización. En este contexto, las especies más 'eficientes' suelen ser las más exitosas y productivas. En términos de evolución, los genes de estas especies son los que tienden a prevalecer y a perdurar en el tiempo. Debido a que varios estudios han demostrado que la competencia subterránea por recursos es más intensa e involucra más vecinos que la competencia aérea por luz (Casper y Jackson, 1997), la eficiencia en el uso de nutrientes es un aspecto clave en la evolución y en el éxito competitivo de las especies

Además de la selección natural, las plantas cultivadas son producto del mejoramiento genético conducido por el hombre. En tal sentido, el notable avance durante el último cuarto del siglo xx, se produjo –principalmente– a partir del incremento del rendimiento en condiciones de alta fertilidad edáfica. Esta fue la base de la "revolución verde", mediante la cual variedades enanas de arroz y trigo fueron desarrolladas para responder a altas dosis de fertilizante nitrogenado, sin manifestar vuelco o toxicidad. Un aspecto negativo de esta 'revolución' es que las nuevas variedades son generalmente ineficientes en la adquisición y uso de nutrientes (Lynch, 1998). Esto implica que su utilización debe necesariamente estar acompañada del empleo de altas dosis de fertilizantes, con el consecuente incremento de los costos de producción y de los riesgos de polución ambiental.

El uso de fertilizantes a nivel mundial se ha incrementado más de diez veces desde 1950. Si bien el nitrógeno es el nutriente requerido en mayores cantidades por las plantas superiores, su caso no es el más dramático desde el punto de vista de sus reservas. El fósforo, en cambio, es uno de los elementos más críticos para la producción agropecuaria, debido a su relativa escasez edáfica, la elevada retención por parte de la matriz del suelo, la falta de reposición natural y la progresiva escasez

de sus fuentes naturales. Por otro lado, la aplicación de elevadas dosis de fósforo, conduce a un enriquecimiento del elemento en aguas subterráneas, lagos, y ríos. La consecuente explosión en la actividad microbiana puede convertir a esas fuentes hídricas en inatractivas para los organismos nativos e incluso provocar enfermedades a los humanos.

Hacia otros Paradigmas

Teniendo en cuenta los factores mencionados, han sido elaboradas propuestas alternativas o complementarias al paradigma de la "revolución verde". Las nuevas aproximaciones, están principalmente basadas en el incremento de la eficiencia en la adquisición y uso de nutrientes por parte de las plantas (ej. Lynch, 1998). Esta reorientación de la actividad agrícola (y paralelamente de la investigación científica en el área) debería conducir a una agricultura más sustentable y rentable. Este nuevo paradigma está siendo apuntalado por investigaciones que comprenden la planta, el suelo y la relación suelo-planta. Plantas que tomen fósforo en bajas concentraciones, o bien que puedan localizar sus raíces en zonas de suelo ricas en fósforo, tendrán una definitiva ventaja en la adquisición de este elemento. En tal sentido, la biotecnología ha cambiado para siempre el escenario del estudio del funcionamiento de las plantas. Las nuevas herramientas que permiten la identificación y clonación de los genes facilitan el entendimiento de procesos fisiológicos y permiten acelerar y ampliar el proceso de mejoramiento vegetal.

En tiempos pasados, los fisiólogos vegetales dedicaban sus esfuerzos a "comprender" el funcionamiento de la planta, hoy el rol de sus investigaciones es mucho más activo. En términos ideales aquella 'comprensión' hoy debe llegar a nivel molecular y en caso de ser aplicable, también a nivel de la identificación de los genes involucrados. Esto deja abierta la posibilidad de transferencia genética a otras plantas, cerrando el ciclo de un proceso fascinante. En este contexto, la comprensión de los mecanismos biológicos involucrados en la eficiencia en el uso de fósforo es el primer paso para la obtención de cultivos eficientes. En el presente trabajo se analizan algunos de los recientes avances en el conocimiento de los mecanismos vegetales que pueden incrementar la eficiencia en la adquisición o utilización del fósforo edáfico.

Arquitectura radical

La configuración espacial del sistema radical es la responsable del patrón de exploración del suelo (Fitter y Stickland, 1992). También determina la habilidad de explorar sectores del suelo con alta fertilidad, a través de la respuesta dinámica de la actividad meristemática (Caldwell, 1994). La arquitectura radical de una planta es determinada por una compleja serie de características, entre las que se encuentra la elongación de los ápices, la ramificación lateral, el gravitropismo y la senescencia. Es particularmente importante para la adquisición de nutrientes que se movilizan en el suelo a través de mecanismos de difusión. Los nutrientes que se mueven por convección o flujo masal (notablemente nitrógeno) pueden desplazarse a través de extensas distancias en el suelo. Los que se mueven por difusión (típicamente fósforo y potasio) solo se desplazan por escasos milímetros, debido a su intensa interacción con la matriz del suelo (Barber, 1962). La absorción de estos nutrientes depende -en gran medida- del grado en que las raíces exploran los diferentes dominios del suelo, en tiempo y espacio (Barber, 1995). Debido a que la disponibilidad de fósforo es normalmente mas elevada en los horizontes superficiales y decrece notoriamente en profundidad, se hipotetizó que sistemas radicales con una concentración de raíces en la superficie del suelo serían más eficientes en la adquisición de fósforo (Lynch y Brown, 2001; Rubio et al., 2001) (Figura 1).

Phaseolus vulgaris como planta modelo

Un relevamiento del germoplasma de *Phaseolus vulgaris*, reveló que los genotipos de esta especie diferían marcadamente en la arquitectura radical (Liao et al., 2001a), hallándose algunos con raíces concentradas cerca de la superficie del suelo y otros con sistemas radicales profundos (Figura 2). Resultados provenientes

de corridas de modelos de simulación (Ge et al., 2000; Rubio et al., 2001), experimentos de invernáculo (Liao et al., 2001a) y de campo (Rubio et al., 2001; Rubio y Lynch, en preparación) indicaron que los sistemas radicales más superficiales conferían notorias ventajas, en términos de adquisición de fósforo. Esas ventajas se debieron a dos causas principales. En primer lugar, a la co-localización espacial del recurso limitante y las raíces. En suelos en los cuales el fósforo estaba homogéneamente distribuido, solo se detectaron pequeñas diferencias atribuibles a los tipos de arquitectura radical. En suelos con fósforo concentrado en la superficie, la absorción de los sistemas superficiales fue notoriamente superior a la de los profundos (Ge et al., 2000; Rubio et al., 2001) (Figura 3). Además, los sistemas superficiales exploraron mas suelo por unidad de biomasa radical debido a que poseen raíces más dispersas y, en consecuencia, menor superposición en la misma planta (Ge et al., 2000; Rubio et al., 2001).

Liao et al. (1998; 2001) detectaron los locus cuantitativos (QTL's) que confieren la distribución espacial de las raíces de esta especie, relacionados con la capacidad de responder a la gravedad. En un experimento de campo se comprobó que los genotipos (RIL's) con raíces superficiales (incluidas las raíces adventicias) resultaron ser superiores a los de raíces profundas, en suelos deficientes en fósforo y sin déficit hídrico (Rubio y Lynch, en preparación) (Figura 4). A partir de estos resultados, se está haciendo la clonación de los genes involucrados (S. Beebe, comunicación personal). En ambientes sujetos a déficits hídricos, la necesidad de explorar los horizontes superficiales se suma a la necesidad de explorar el subsuelo, donde usualmente los contenidos de agua son mayores. En tal sentido, existen experimentos en marcha acerca de la co-optimización de la arquitectura radical en condiciones de simultáneo déficit de fósforo y de agua (Liao et al., 2001b; Melissa

Ho, comunicación personal). Por otro lado, ciertos reportes indican que el etileno (un gas con efectos hormonales en las plantas) ocuparía un rol muy activo en la regulación de las respuestas gravitropicas de las raíces ante deficiencias de fósforo (Lynch y Brown, 1997). El contenido de etileno en *Phaseolus vulgaris* fue casi el doble en plantas estresadas en fósforo (Borch et al., 1999) y aparece como involucrado en la mediación del cambio en la arquitectura radical, en respuesta al stress fosforado (Lynch y Brown, 2001). Aunque las evidencias experimentales son aún escasas, la relación entre la producción de etileno y la biodisponibilidad de fósforo aparece como estrecha.

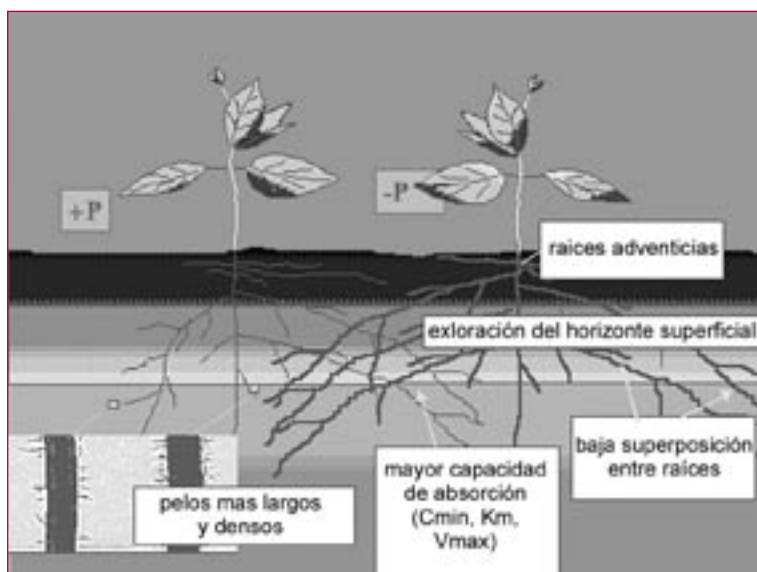


Figura 1. Influencia de la arquitectura radical en la eficiencia en la adquisición de fósforo.

Cinética de la absorción de fósforo

La capacidad de las raíces de absorber fósforo está regulada por transportes de alta y baja afinidad. En las concentraciones normales del fósforo del suelo, del orden de los micromoles, solo el sistema de alta afinidad es el que actúa. Estos sistemas siguen aproximadamente la cinética de primer orden y pueden ser caracterizados por tres parámetros principales: C_{min} (mínima concentración del nutriente en la solución del suelo que es capaz de absorber la raíz), K_m (concentración del nutriente en la solución del suelo en la que se observa una velocidad de absorción equivalente a la mitad de V_{max}) y V_{max} (máxima capacidad de absorción de nutrientes). Recientemente, se ha desarrollado un método ('filmless autoradiography') que permite identificar estos parámetros, a escala detallada (Rubio, Sorgona, Lynch, en preparación). Utilizando este método, es posible hacer un mapa de la capacidad de absorción de fósforo de la planta. Esto es, a partir de la determinación de los parámetros de la cinética de absorción, a lo largo de las raíces, en segmentos tan cortos como 1 mm y distinguiendo entre distintos tipos de raíces. Utilizando este método, se ha observado que diferentes variedades de citrus, utilizados como "pie de injerto", difieren marcadamente en su capacidad de absorción de fósforo. Interesantemente, se comprobó que el genotipo con mayor V_{max} , era también el más 'eficiente' en la adquisición del elemento, considerando el crecimiento y la absorción total del fósforo (Figura 5). Los primeros resultados, conducen a considerar al método como una herramienta válida para identificar genotipos eficientes, factibles de ser tenidos en cuenta en programas de mejoramiento vegetal.

Por otro lado, se ha avanzado en la codificación de los genes que codifican las proteínas responsables de los sistemas de absorción y asimilación de fósforo. Seis diferentes tipos de transportadores de fósforo han sido identificados en *Arabidopsis* (Okumura et al., 1998) y ocho en cebada (Smith, 2001). Sin embargo, hasta la fecha, no ha sido posible discernir los roles de cada uno de estos transportadores (Smith, 2001). Sí,

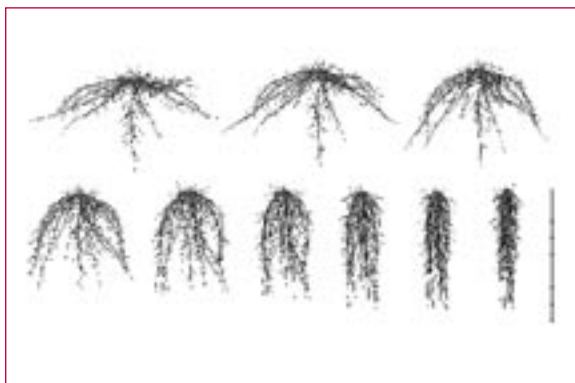


Figura 2. Raíces de *Phaseolus vulgaris* de diferente arquitectura radical (Ge et al., 2000).

se ha comprobado, que estos sistemas son regulados en mayor medida por el status nutricional general de la planta que por la presencia de bolsones ricos de fósforo, en el suelo (Liu et al., 1998).

Acción de las raíces sobre la rizósfera y su influencia en la absorción de fósforo

Cerca del 95% de los iones fosfato que llegan a la rizósfera lo hace a través del mecanismo de difusión. Esta difusión es conducida por el gradiente de concentración iónica entre la rizósfera y el seno del suelo. Raíces capaces de absorber fósforo en bajas concentraciones, provocan que este gradiente sea mayor y que se incremente la cantidad de iones movilizados. Esta mayor capacidad puede ser lograda por diferentes mecanismos, como se describe en diferentes partes de este texto.

La continua deposición de compuestos orgánicos (principalmente citrato, oxalato y malato) e inorgánicos determina que la zona adyacente a las raíces posea características biológicas muy diferentes a las del seno del suelo. Esto resulta en que la biodisponibilidad de fósforo difiere, marcadamente, en ambas zonas. Tanto el pH como la concentración de ácidos orgánicos en la rizósfera, influyen en la disponibilidad de fósforo. El efecto principal de la acidificación de los volúmenes de suelo adyacentes a la raíz es la solubilización de fosfatos ligados al calcio. Los aniones orgánicos secretados por las raíces pueden reemplazar a los fosfatos adsorbidos que eventualmente pasan a la solución del suelo. Sin embargo, la cantidad de ácidos orgánicos excretados por la mayoría de las raíces es relativamente pequeña, comparada con la cantidad de nutrientes absorbidos por la planta (Jones, 1998). Esto estaría indicando que los efectos de estos compuestos orgánicos sobre el pH rizosférico y por sobre la absorción de fósforo del suelo serían poco relevantes.

En un resultado mas que interesante, Lopez-Bucio et al. (2000) lograron, mediante ingeniería genética, exacerbar la exudación de citratos por parte de raíces de tabaco lo cual provocó un incremento en la

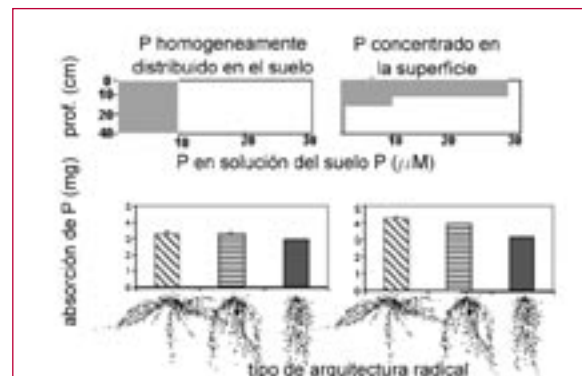


Figura 3. Absorción de P por las raíces de diferente arquitectura en suelos con diferente distribución de P (adaptado de Ge et al., 2000 y Rubio et al., 2001).

disponibilidad de fósforo del suelo. Otra característica para ser explotada, en planes de fitomejoramiento, es el incremento natural en la exudación de aniones orgánicos en respuesta a bajos niveles de fósforo en el suelo. Esto fue observado en alfalfa, rábano, colza y otras especies (Neuman, 1999; Zhang et al., 1997). También se ha observado que la deficiencia de fósforo induce a un incremento en la liberación de H^+ a la rizósfera en maíz, lupino y otras especies (Neuman, 1999; Bertrand et al., 1999).

Promoción de la formación de pelos radicales en suelos deficientes en fósforo

Los pelos radicales son células especializadas de la capa exterior del tejido epidérmico de las raíces, que se extienden en forma perpendicular al eje de la raíz. Debido a su forma alargada, avanzan hacia el seno del suelo, incrementando notoriamente la capacidad de exploración de la raíz. Existen evidencias de que su presencia implica un incremento en la adquisición de nutrientes inmóviles, como el fósforo (Gahoonia y Nielsen, 1998; Bates y Lynch, 2000).

Hay una amplia variación genotípica en la formación y morfología de pelos radicales (Peterson y Farquhar, 1996; Green et al., 1991). En experimentos realizados con distintas especies, creciendo en un rango de disponibilidades de fósforo, se ha observado el carácter plástico de la formación de pelos radicales. Bajo condiciones de déficit fosfórico, se ha encontrado un incremento en el largo de los pelos radicales (Bates y Lynch, 1996, 2000) (Figura 1). Después de 6 días de crecimiento, el largo promedio de los pelos radicales de *Arabidopsis thaliana* resultó ser seis veces mayor, en plantas creciendo en un medio deficitario, que en un medio bien provisto (Bates y Lynch, 1996). Este fenómeno, no fue observado en respuesta a otros nutrientes (Bates y Lynch, 1996).

La densidad de pelos radicales también aparece como muy dependiente de la disponibilidad de fósforo en el medio. Ma et al. (2001), observaron que el número de pelos radicales por unidad de largo de raíz, fue cinco veces mayor en los tratamientos de baja disponibilidad, que en los de alta disponibilidad. En este caso, otros nutrientes también causaron el mismo efecto (ej, zinc

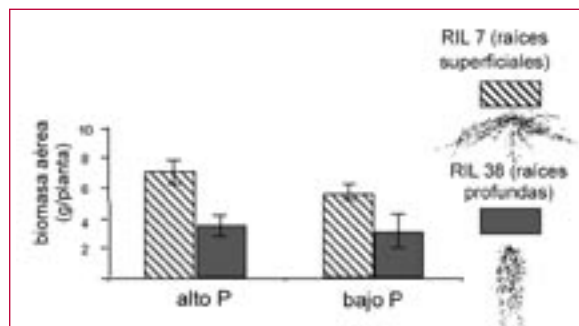


Figura 4. Acumulación de biomasa aérea de 2RILs de *Phaseolus vulgaris* que difieren en arquitectura radical. Cosecha a las 4 semanas, experimento de campo.

y hierro), pero no tan marcadamente (Ma et al., 2001). Por medio de modelos de simulación, Ma et al. (2001) demostraron que estos cambios en los pelos radicales de *Arabidopsis*, ante deficiencias de fósforo, constituyen una positiva adaptación para la adquisición del elemento y que la combinación de todos ellos, provoca un efecto sinérgico positivo del 30 al 400%.

Consideraciones finales

Este relato no pretende abarcar todas las líneas de investigación acerca del porque algunas plantas son mas eficientes en la adquisición y uso del fósforo que otras. Dada la diversidad de esas líneas, tal objetivo excedería largamente este espacio. Se trató, en cambio, de individualizar algunas de ellas, para ejemplificar las inmensas posibilidades que brindan las nuevas herramientas tecnológicas disponibles, principalmente la biotecnología. Son crecientes los ejemplos de que este tipo de protocolos han culminado en genotipos mejorados transgénicamente.

A pesar de estar en sus comienzos, las investigaciones tendientes a la obtención de cultivares eficientes en el uso de la oferta de fósforo y otros nutrientes del suelo son promisorias. La ciencia del suelo no puede estar aislada de investigaciones de esta índole, las que sin duda tendrán un rol preponderante en la investigación científica en el campo de la biología y agronomía, en el siglo que comienza.

Referencias

- Barber S. 1962. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci*, 93, 39-49.
- Barber S. 1995. *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. J Wiley and Sons, NY.
- Bates T. y Lynch J.P. 1996. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability. *Plant Cell Env*, 19, 529-538.
- Bates T. y Lynch J.P. 2000. The efficiency of *Arabidopsis thaliana* (Brassicaceae) root hairs in phosphorus acquisition. *Amer. J. Bot.*, 87, 964-970.
- Bertrand I; Hinsinger P; Jaillard B. y Arvieu J.C. 1999. Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. *Plant and Soil*, 38, 161-175.
- Borch K; Bouma T.J; Lynch J.P. y Brown K.M. 1999. Ethylene: a regulator of root architectural responses to soil phosphorus availability. *Plant Cell Env*, 22, 425-431.

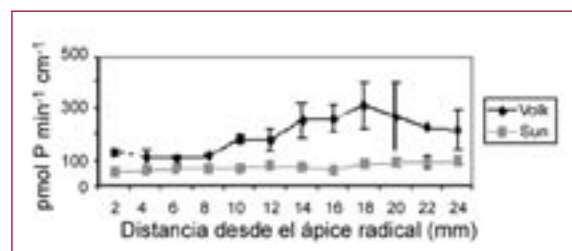


Figura 5. Variación de V_{max} a lo largo de las raíces de dos genotipos de citrus (Rubio, Sorgona, Lynch).

- **Caldwell M.** 1994. Exploiting nutrients in fertile soil microsites. In *Ecophysiological processes above and below ground*. Ed: M Caldwell, RP Pearcy, Acad Press. San Diego, pp. 325-347.
- **Casper B.D. y Jackson R.B.** 1997. Plant competition underground. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 28: 545-570.
- **Fitter A.H. y Stickland T.R.** 1992. Architectural analysis of plant root systems. 3. Studies of plants under field conditions. *New Phytologist*, 121, 243-248.
- **Gahoonia T.S. y Nielsen N.** 1998. Direct evidence on participation of root hairs in phosphorus (P-32) uptake from soil. *Plant Soil*, 198, 147-152.
- **Ge Z; Rubio G. y Lynch J.** 2000. The importance of root gravitropism for interroot competition and phosphorus acquisition efficiency: results from a geometric simulation model. *Plant Soil*. 218, 159-171.
- **Green, R, B Beard, y MJ Oprisko.** 1991. Root hairs and root lengths in nine warm-season turfgrass genotypes. *J Am Soc Hort Sci*, 116, 965-969.
- **Jones D.** 1998. Organic acids in the rhizosphere - a critical review. *Plant Soil*, 166, 247-257.
- **Liao H; Rubio G; Yan X; Cao A; Brown K.M. y Lynch J.P.** 2001a. Effect of phosphorus availability on basal root shallowness in common bean. *Plant and Soil* 232:, 69-79.
- **Liao H; Ge Z. y Yan X.** 2001b. Ideal root architecture for phosphorus acquisition of plants under water and phosphorus coupled stress: from simulation to application. *Chinese Science Bulletin*, 46, 1346-1351.
- **Liu H; Trieu A.T; Blaycock L.A. y Harrison M.J.** 1998. Cloning and characterization of two phosphate transporters from *Medicago trunculata* roots: regulation in response to phosphate and to colonization by arbuscular mycorrhizal fungi. *Mol Plant Microbe Interact*, 11, 14-22.
- **Lopez-Bucio J; Martínez de la Vega O; Guevara Garcia A. y Herrera Estrella L.** 2000. Enhanced phosphorus uptake in transgenic tobacco plants that overproduce citrate. *Nat Biotech*, 18,450-453.
- **Lynch J.P. y Brown K.M.** 1997. Ethylene and plant responses to nutritional stress. *Physiol Plant*, 100, 613-619.
- **Lynch J.P.** 1998. The role of nutrient-efficient crops in modern agriculture. In *Nutrient use in crop production*. Ed: Z. Rengel, The Haworth Press, Binghamton, pp. 241-264.
- **Lynch J.P. y Brown K.** 2001. Topsoil foraging – an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. *Plant Soil*, 237 :225-237
- **Ma Z; Bielenberg D.G; BrownK.M. y Lynch J.P.** 2001. Regulation of root hair density by phosphorus availability in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Env*, 24, 459-467.
- **Neuman G.R.V.** 1999. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. *PlantSoil*,211, 121-130.
- **Okumura S. M.N; Shirano Y. y Shibata D.** 1998. Phosphate transporter gene family of *Arabidopsis thaliana*, *DNA Res*, 5, 261-269.
- **Peterson R.L. y Farquhar M.L.** 1996. Root hairs: Specialized tubular cells extending root surfaces. *Bot Rev*, 62, 1-40.
- **Rubio G; Walk T; Ge Z; Yan X; Liao H. y Lynch J.P.** 2001. Root gravitropism and belowground competition among neighboring plants: a modeling approach. *Annals Botany*, 88, 929-940.
- **Smith F.** 2001. Sulphur and phosphorus transport systems in plants. *Plant Soil*, 232, 109-118.
- **Zhang F; Ma J. y Cao Y.P.** 1997. Phosphorus deficiency enhances root exudation of low molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by radish (*Raphanus sativus* L.) and rape (*Brassicca napus* L.) plants. *Plant Soil*, 196, 261-264.

Puntos relevantes de la discusión durante el Simposio

*Ing Agr. Tomás Loewy
Coordinador del Simposio*

Tasas de remoción y pérdidas históricas del fósforo del suelo

El balance histórico de la fertilidad fosfórica del suelo, muestra caídas dramáticas del elemento en el área pampeana. Estas pérdidas son básicamente cuantitativas, pero también se detectan algunos cambios cualitativos, en detrimento de la disponibilidad para los cultivos. El monto total de las pérdidas, a través del tiempo, resultó sorprendente. Además de las comparaciones entre suelo cultivado y virgen, éstas se fundamentaron en la modalidad de producción, sumamente extractiva. Se discutió acerca de la conveniencia de la utilización del Silicio, como indicador de la tasa de meteorización de otros elementos, entre ellos el fósforo.

El informe destaca que la reposición, vía fertilizantes, fue de 1/20 partes, en el periodo 1960/90 tornándose luego a 1/4 del fósforo removido. Además de los factores técnicos y culturales, la relación de precios insumo/producto ejerce una influencia decisiva sobre la evolución del balance fosfórico. Esto deja planteado un fuerte interrogante acerca de la nutrición futura de los cultivos y la performance de los sistemas productivos de la región.

Fósforo orgánico, diagnóstico y fertilidad fosfórica

El fósforo orgánico aparece como una reserva significativa de la fertilidad, en los suelos de la región. Su importancia relativa, empero, puede asociarse (en cada zona) al sistema de labranza y a la rotación de cultivos. Se afirmó que existe una relación negativa entre el P-orgánico y el rendimiento de trigo, añadiendo que la situación no difería para las pasturas.

Se han reportado casos de baja o nula repuesta a la fertilización, tras la roturación de una pastura perenne. Esto condice con el incremento de la biomasa

microbiana (principal asiento del fósforo orgánico), con pradera o siembra directa y su reducción, en el ciclo de cultivos anuales, bajo labranza. Se destaca la necesidad de ponderar este pool fosfórico, bajo distintas condiciones de suelo y su manejo, como un aporte consistente al diagnóstico y monitoreo del elemento. Hasta el momento, empero, no existe una metodología de rutina para evaluar la tasa de mineralización del fósforo. Se mencionó que la fertilización podría inhibir la acción de las P-hidrolasas. Por lo tanto, se debería estudiar la mineralización del P-orgánico en lotes no fertilizados. En cuanto a la habilidad de los extractantes para predecir la respuesta a la fertilización se enfatizó diferenciar leguminosas de no leguminosas, por su diferente eficiencia de uso.

Aptitud de la absorción vegetal de nutrientes y fertilidad del suelo

Se planteó la virtual o aparente contradicción entre una exacerbación del balance negativo del P en los ecosistemas y la utilización de cultivares con mayor eficiencia en la adquisición del elemento. Los avances de la biotecnología, en el entendimiento de los mecanismos involucrados en esa adquisición, no proponen acentuar el agotamiento o prescindir de la fertilización. A lo sumo pueden llegar a reducir momentáneamente las dosis aplicadas, pero sin comprometer la fertilidad edáfica.

Es conocido el bajo aprovechamiento relativo del fósforo aplicado como fertilizante, que se estima en el orden del 20 %. Recursos como una mejor arquitectura radical y particularmente, la capacidad de solubilización del P no lábil, permitirían recuperar buena parte de fertilizaciones previas, alojadas en pools de baja disponibilidad. Al respecto, el caso de Australia fue mencionado, donde ambas técnicas resultan complementarias.